

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO



INSTITUTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE
FÍSICA

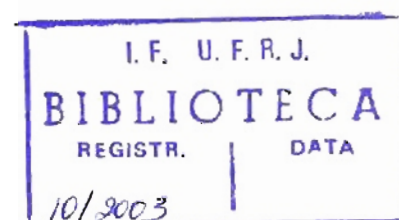
TÓPICOS DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

**Aluno: Christiano Jorge Gomes
Pinheiro**

Orientador: Prof. Adir Moysés Luiz

2003

10/2003



RESUMO

Este trabalho contém uma proposta de ensino de Física para o 2º grau, que analisa aspectos da Física Moderna, incluindo alguns tópicos de Mecânica Quântica. Destina-se aos alunos de licenciatura em Física, bem como aos professores de Física do 2º grau, com a intenção de levar os alunos a compreender melhor os conceitos relativísticos e sua relevância na vida moderna. Estas sugestões de aulas são descritas através de teorias, experiências, exemplos, perguntas e respostas que estabelecem vínculos entre cada teoria e o cotidiano.

A primeira parte deste trabalho dedica-se a analisar a Física Moderna, definições de alguns conceitos básicos relacionados com a Relatividade Restrita e com a Relatividade Geral.

A segunda parte do trabalho refere ao estudo de alguns Tópicos de Mecânica Quântica: o efeito fotoelétrico e a dualidade onda partícula.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	TÓPICOS DE FÍSICA MODERNA	4
2.1	EVOLUÇÃO HISTÓRICA	4
2.2	A TEORIA DA RELATIVIDADE	5
2.3	RELATIVIDADE GERAL	13
2.4	EFEITO FOTOELÉTRICO	23
2.5	ÁTOMO DE HIDROGÊNIO	27
2.6	A DUALIDADE ONDA PARTÍCULA	30
3	EXPERIÊNCIAS DE FÍSICA MODERNA	34
3.1	COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE AS EXPERIÊNCIAS	34
3.2	EXPERIÊNCIA IMAGINÁRIA 1	34
3.3	EXPERIÊNCIA 2	36
3.4	EXPERIÊNCIA 3	36
3.5	EXPERIÊNCIA 4	37
4	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Devemos ter sempre em mente, que a *Física* enquanto área de conhecimento é necessária para a formação do estudante de ensino médio, pois, conjuntamente com a Química, a Biologia e a Matemática, deverá garantir uma base para a formação científica. Sendo assim a preocupação desta proposta é subsidiar um trabalho didático que permita auxiliar o estudo dos conceitos, leis, relações da *Física* e sua utilização, bem como a sua aproximação com fenômenos ligados a situações vividas pelos alunos, sejam as de origem natural, sejam as de origem tecnológica.

Apesar das críticas que venho recebendo, com relação à dificuldade de se ensinar a *Física Moderna* no ensino médio, faço a pergunta, "É válido ensinar *Física Moderna* para quem tem dificuldade em somar ?" - Confesso-lhes que a proposta ganhou força a partir deste ponto, após uma profunda análise dos PCNs [1], questiono-me "Para que serve o ensino de *Física* no ensino médio ?"

Hoje devido ao grande avanço dos meios de comunicação, a Internet, TV a cabo, telefone celular, revistas, livros, filmes, desenhos e até religiões abordam temas científicos que circulam os quatro cantos da Terra e que despertam a atenção das pessoas desestimuladas com uma *Física* que é considerada terrível, mesmo antes delas estudarem, por que assim lhes é passada pelas gerações anteriores. Nos dias atuais pretende-se dar destaque ao ensino de *Física* no ensino médio, independentemente de o aluno dirigir-se ou não ao ensino superior. Portanto, pode parecer difícil a utilização desta proposta pelos professores que atuam com uma preocupação exclusiva em preparar os alunos para exames vestibulares. Entretanto, fica garantida tanto a possibilidade do ingresso como o desempenho no curso superior. O principal objetivo desta monografia é apresentar um texto que sirva de base para os colegas que desejarem lecionar *Física Moderna* no ensino médio.

Os livros [2-9] foram os únicos que se preocuparam em discutir alguns tópicos de *Física Moderna*. Portanto, acreditamos que esta monografia poderá fornecer nova contribuição para a elaboração de aulas de *Física Moderna* no ensino médio.

Minha experiência em lecionar estes tópicos, formou o pilar deste trabalho. Tudo se iniciou com a minha convocação para lecionar em uma turma especial (preparatório para os vestibulares do IME e ITA). No Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), a *Física Moderna* faz parte da ementa do concurso (vestibular).

Nas reuniões pedagógicas para início do ano letivo, fiz uma proposta para o futuro. Pedi para que fosse feita uma preparação com a turma do primeiro ano do ensino médio na intenção de que sendo incluído a *Física Moderna* na ementa dos vestibulares cariocas, esses alunos não precisariam aprender uma nova matéria e sim rever a *Física Moderna*, como acontece com as outras partes da *Física*. Assim foi possível agradar a todos, o coordenador com os olhos para o vestibular, os alunos que teriam a oportunidade de aprender e o meu projeto de final de curso. Devo ressaltar que tinha como ponto positivo com o coordenador do colégio, a implantação do meu trabalho de Instrumentação para o Ensino de *Física* (corrente elétrica e energia elétrica) aproveitando o período do "Apagão". Segundo a avaliação que tive do trabalho na Universidade, a avaliação do coordenador e dos alunos o trabalho teve boa aceitação. Acredito neste ponto como o grande impulso para o começo do projeto "*Física Moderna* no ensino médio".

Após o sinal verde, o passo seguinte foi à escolha de um livro de *Física* para o primeiro ano do ensino médio que além de ter uma boa base de todos os conceitos, como questão do éter, como era a vida antes e depois da *Física Moderna*, massa gravitacional e inercial e outros tópicos, não só abordando o estudo de toda a *Física* como o estudo da *Física Moderna*.

Foi uma experiência incrível o dia em que testei em sala a experiência 1 do Capítulo 3 desta monografia. A turma já havia estudado e sido testada em movimento relativo (*Física I* - Mecânica - Cinemática). Ressalto como ponto positivo desta experiência, o fato de mesmo sabendo que não existem objetos se movendo com velocidades próximas da velocidade da luz, o empenho dos alunos e a criatividade desenvolvida por tratar-se de um assunto novo, foi algo contagiante.

Entre o final do século XIX e o início do século XX, chegou-se ao modelo de átomo que hoje conhecemos, e os físicos criaram a teoria que conseguiu explicar o comportamento do átomo: a *Mecânica Quântica*. A partir daí, os físicos

passaram a estudar a estrutura da matéria e do Universo, o que significou uma fusão entre a *Física* e a *Química*.

Hoje sabemos que o Universo é formado de matéria e energia. Como exemplo de energia podemos citar a luz, que, de acordo com a *Mecânica Quântica*, é formada por pequenos "pacotes" de energia, denominados fótons. Como exemplo de matéria podemos citar o próton, o nêutron, e o elétron. Mas, além dessas três partículas existem muitas outras, como pósitrons, neutrinos, káons, etc., que no entanto não fazem parte do átomo. Essas outras partículas surgem em reações nucleares e possuem vida curta: mal aparecem e imediatamente se transformam numa das três partículas básicas (próton, nêutron e elétron) ou se transformam em fótons. Uma das descobertas mais fascinantes da *Física* no século XX é a possibilidade da transformação de matéria em energia e de energia em matéria. Uma outra descoberta importante é que o próton e o nêutron não são indivisíveis como se pensava. Eles são formados por partículas ainda menores, denominadas quarks.

No início do século XX surgiram duas teorias revolucionárias a *Teoria da Relatividade* e a *Mecânica Quântica*. A *Teoria da Relatividade* só é necessária quando consideramos velocidades muito grandes e a *Mecânica Quântica* só é necessária quando examinamos objetos muito pequenos (prótons, elétrons, átomos, etc.). Para o estudo dos corpos macroscópicos usamos a *Física* desenvolvida até o século XIX, conhecida como *Física Clássica*; a *Física* do século XX é conhecida como *Física Moderna*.

Esta proposta contém uma parte da *Mecânica Quântica* e as *Teorias da Relatividade Restrita e Geral*. Não ficou de fora o contexto histórico e nem conceitos básicos, que devem ser apresentados aos alunos a partir do primeiro ano do ensino médio. Logo após a apresentação teórica (Capítulo 2) dedicamos um capítulo para experiências Capítulo 3. Finalmente, apresentamos as conclusões do nosso trabalho no Capítulo 4.

2 TÓPICOS DE FÍSICA MODERNA

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Neste capítulo depois de resumir a evolução histórica, apresentaremos alguns fundamentos da *Física Moderna*: a *Teoria da Relatividade* e alguns tópicos de *Mecânica Quântica*.

No final do século XIX, muitos físicos famosos acreditavam que a tarefa da *Física* havia terminado, que nada mais havia para descobrir. A. A. Michelson, dirigindo-se aos cientistas no final do século XIX, declarou o seguinte: "Os grandes princípios já estão firmemente estabelecidos... as futuras verdades da *Física* terão que ser procuradas na sexta casa decimal" (Ref.[6]). Havia apenas alguns problemas. Entretanto, segundo eles, bastaria apenas um pouco de empenho para resolvê-los. Com o passar do tempo, porém, perceberam que esses problemas não eram tão pequenos quanto pensavam. Já existiam rupturas nos alicerces da *Física Clássica*. Duas delas foram consideradas por Lorde Kelvin, em suas famosas conferências em Baltimore, em 1900, como "duas nuvens" no horizonte da *Física* do século XX: a incapacidade da teoria de descrever o espectro de radiação emitido por um corpo negro e os resultados inexplicáveis do experimento de Michelson-Morley. Na verdade, a ruptura da *Física Clássica* ocorreu em muitos setores ao mesmo tempo: o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley contrariava a *Relatividade Newtoniana*; o espectro da radiação de corpo negro não estava de acordo com as previsões da termodinâmica; o efeito fotoelétrico e os espectros dos átomos não podiam ser explicados pela *Teoria Eletromagnética*; os fascinantes fenômenos associados aos raios X e a radioatividade pareciam estar totalmente fora do contexto da *Física Clássica*. Por isso, só puderam ser resolvidos com a criação de duas novas teorias: a *Teoria da Relatividade* e a *Mecânica Quântica*.

Essas teorias revolucionaram a *Física* no início do século XX e ajudaram a conhecer muito da estrutura da matéria. Essas teorias não só dissiparam as "nuvens escuras" de Kelvin, mas forneceram respostas para todos esses enigmas e muito mais. A aplicação dessas teorias a sistemas microscópicos como átomos, moléculas, núcleos atômicos e partículas elementares e a sistemas

macroscópicos (sólidos, líquidos, gases e plasmas) nos permitiu compreender melhor a natureza e revolucionou nossa forma de viver.

2.2 A TEORIA DA RELATIVIDADE

A *Teoria da Relatividade* foi criada pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) em duas etapas: em 1905, ele publicou um trabalho que mais tarde ficou conhecido pelo nome de *Teoria da Relatividade Especial*, que trata do movimento uniforme. A princípio, Einstein se restringiu a um objeto se movendo com velocidade constante um em relação ao outro e em linha reta. Ele não tentou lidar com acelerações ou com objetos se movendo em círculos e outras trajetórias curvas. Esse é o sentido no qual a teoria que ele obteve em 1905 é especial: o termo significa "restrita", como em algo que é um caso especial de um fenômeno mais geral. Mas, ainda que sua teoria fosse restrita nesse sentido, ela era diferente de tudo o que se vira até então.

Einstein deu solução a um dos impasses, surgidos na *Física* no final do século XIX, relacionado ao *Eletromagnetismo*: o significado da constante c das equações de Maxwell, identificada como velocidade da luz no vácuo. Como a velocidade da luz poderia ser constante se a luz propaga-se no éter e as fontes de luz se moviam nos mais diferentes sentidos através do éter? Outro impasse, o eletromagnetismo, que unificou a eletricidade, o magnetismo e a óptica, acabou, paradoxalmente, originando uma grande divisão na *Física*. As leis da mecânica newtoniana não eram sempre válidas para o eletromagnetismo.

Movimento e Repouso

Em nossas experiências diárias, observando um poste na rua, dizemos com convicção: "esse poste não está em movimento; ele está em repouso". Se virmos uma pessoa andando, diremos com a mesma convicção: "a pessoa está em movimento". Mas o que diria um observador na Lua? Se esse observador dispusesse de um potente telescópio, veria o poste girar junto com a Terra. Portanto esse observador na Lua diria: "O poste está em movimento".

- O poste está em repouso em relação à Terra; e
- O poste está em movimento em relação à Lua.

A principal razão dessas considerações é que a descrição do movimento não é a mesma para qualquer observador.

Suponhamos um astronauta dormindo dentro de uma nave espacial e que seja ejetado para o espaço, sem acordar. Algum tempo depois, acorda e se vê sozinho, "perdido no espaço". Não há nenhum corpo próximo. A princípio só vê pontos luminosos muito distantes, que são as estrelas. Repentinamente, olha para um dos lados e vê aproximando-se dele uma nave. Então pensa: "Estarei eu parado e a nave em movimento, se aproximando de mim? Ou estará a nave parada e eu me aproximando dela? Ou estaremos ambos em movimento nos aproximando um do outro? Essa é uma situação angustiante, não há como chegar a uma conclusão. No espaço não há paredes, chão e nem teto. O astronauta não pode sequer dizer se está "de cabeça para cima" ou de "cabeça para baixo"; essas noções só têm sentido em relação ao solo de um planeta.

Os Postulados de Einstein

Os postulados de Einstein constituem a base da *Teoria da Relatividade Restrita*; estes postulados foram publicados em 1905.

O primeiro desses postulados foi chamado por Einstein de *Princípio da Relatividade*:

As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Não existe um referencial inercial privilegiado.

O segundo postulado refere-se à velocidade da luz:

A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c (aproximadamente 300000km/s) em relação a qualquer referencial inercial.

A Relatividade do tempo

Vamos supor que desejamos medir o intervalo de tempo gasto para ocorrer um fenômeno. Uma das consequências dos postulados de Einstein é que o valor desse intervalo de tempo vai depender do referencial em que está o observador. Se tivermos dois observadores situados em dois referenciais inerciais diferentes, um tendo velocidade constante em relação ao outro, os intervalos de tempo

medidos por esses observadores serão diferentes. Observe a situação descrita na Fig. 1



Fig. 1 Trajetória da luz para um observador localizado dentro do trem. (Ref. [2])

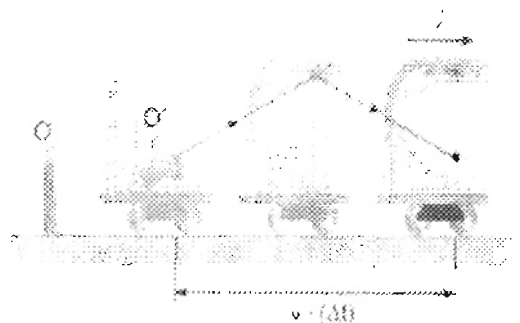


Fig. 2 Trajetória da luz vista por um observador do lado de fora do trem. (Ref. [2])

Nas Figuras 1 e 2 representamos um trem que se move com velocidade constante v em relação ao solo. Dentro do vagão há um observador O' , fixo em relação ao vagão, e fora dele há um observador O , fixo em relação ao solo. Para simplificar, vamos representar o intervalo de tempo Δt por t e o intervalo de tempo Δt_0 por t_0 .

O observador O' aciona uma fonte de luz que envia um pulso para cima. Esse pulso é refletido por um espelho e volta para a fonte. Para o observador O' , na ida e na volta o pulso de luz gasta um intervalo de tempo Δt_0 dado por:

$$2d_o = ct_o \quad (1)$$

em que c é a velocidade da luz.

Representamos o trajeto da luz como é visto pelo observador O , o qual mede um tempo t para o percurso da luz. Nesse intervalo de tempo, para o observador O o deslocamento do trem foi igual a vt enquanto o deslocamento da luz foi:

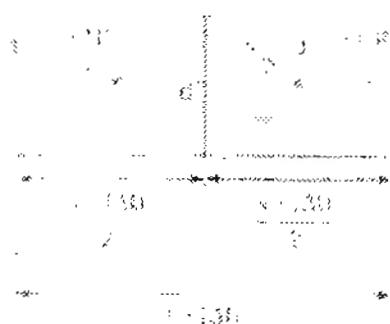


Fig. 3 Figura reproduzida da (Ref. [2])

$$2d = ct \quad (2)$$

pois a velocidade da luz é a mesma c para os dois observadores.

Das Equações (1) e (2), obtemos:

$$2d_o = ct_o; \quad t_o = 2d_o/c$$

$$d = ct; \quad t = 2d/c$$

como $d_o < d$, temos:

$$t_o < t$$

dai podemos concluir que um relógio que está em um referencial que se move em relação a nós se atrasa em relação ao nosso relógio.

A relação anterior vale para todos os processos físicos, incluindo reações químicas e processos biológicos.

O intervalo de tempo t_o , em que os dois eventos (emissão e recepção da luz) ocorrem no mesmo local, e chamado de tempo próprio. Para qualquer outro referencial inercial o intervalo de tempo (t) é maior do que o tempo próprio.

Vamos agora encontrar uma equação que relacione t com t_0 . aplicando o teorema de Pitágoras ao triângulo retângulo sombreado na Fig. 3, temos:

$$d^2 = d_0^2 + (vt/2)^2$$

Desenvolvendo a expressão anterior obtemos:

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (3)$$

A Eq. 3 mostra que o tempo t é maior do que o tempo próprio t_0 . Este resultado é chamado de dilatação do tempo.

Evidências da dilatação de tempo

Uma das primeiras evidências da dilatação temporal foi obtida por meio de experimentos com uma partícula chamada **múon**. Quando fazemos experimentos no laboratório com múons em repouso, observamos que eles desintegram com uma vida média de 2.2×10^{-6} s. Muitos múons são criados na alta atmosfera, como resultado do bombardeio dos raios cósmicos. Esses múons movem-se com velocidade próxima da luz:

$$v \approx 2,994 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Portanto, entre o momento em que são criados e o momento em que se desintegram, deveriam percorrer, em média, uma distância de :

$$d = vt$$

substituindo os valores : $c = 3 \times 10^8$ m/s e $t = 2.2 \times 10^{-6}$ s, obtemos:

$$d = 650 \text{ m}$$

No entanto, a experiência mostra que múons criados a quase 10 km de altitude são detectados na superfície da Terra. Isso acontece por causa da dilatação temporal. Num referencial fixo no múon, o tempo de desintegração é:

$$t_0 = 2,2 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Para um referencial fixo na Terra, de acordo com a Eq. (3), obtemos:

$$t = 35 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Assim, para um observador na Terra, a distância percorrida pelo múon antes de desintegrar-se é:

$$d = vt$$

substituindo $v = 2,994 \times 10^8$ m/s e $t = 35 \times 10^{-6}$ s, obtemos: $d = 10479 \text{ m}$

A Relatividade do Comprimento

Suponhamos que um objeto tenha comprimento L_0 quando em repouso em relação a um observador. Einstein mostrou que, quando se move com velocidade v (em relação a esse mesmo observador) na mesma direção em que foi medido o comprimento, esse objeto apresenta um comprimento L . Dizemos então que houve uma contração de comprimento. A equação que liga L_0 e L é:

$$L = L_0(1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (4)$$

A Eq. (4) mostra que o comprimento L é menor do que o comprimento próprio L_0 . Este resultado é chamado de contração do comprimento ou contração de Lorentz.

A Relatividade da Massa

Outra consequência dos postulados de Einstein é que a massa inercial varia com a velocidade.

Sendo m_0 a massa de um corpo quando está em repouso em relação a um referencial inercial e m a massa desse mesmo corpo quando tem velocidade v em relação a esse mesmo referencial, temos:

$$m = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (5)$$

A Eq. (5) mostra que a massa aumenta com a velocidade. Porém, para que o denominador não se anule, a velocidade v não pode atingir (nem superar) o valor c .

O que aumenta com a velocidade não é a quantidade de matéria existente no corpo, mas sim sua massa inercial, a qual mede a inércia do corpo. Quanto maior a velocidade, maior será a inércia, isto é, mais difícil torna-se a variação de velocidade.

Massa e Energia

Entre o público, o aspecto mais conhecido da *Teoria da Relatividade* é, sem dúvida, a equação

$$\boxed{E = mc^2} \quad (6)$$

que relaciona a massa (m) com a energia (E).

Vamos analisar o significado da equação: $E = mc^2$. Como foi dito, Einstein introduziu a *Teoria da Relatividade* em seu trabalho "Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento", escrito em junho de 1905. Em setembro do mesmo ano, ele publicou mais um pequeno trabalho, complementando o anterior, intitulado "A inércia de um corpo depende de seu conteúdo de energia?".

Nesse trabalho ele mostrou que a massa inercial de um corpo varia toda vez que esse corpo ganha ou perde energia.

Assim, a massa de um tijolo quente é maior do que a de um tijolo frio; uma mola comprimida tem massa maior do que quando não estava comprimida, pois o acréscimo de energia potencial elástica ocasiona um aumento da massa inercial da mola. Quando um corpo tem sua velocidade aumentada, aumenta também sua energia cinética; é esse aumento de energia cinética que acarreta o aumento da massa inercial do corpo, de acordo com a Eq. (5).

Energia Cinética

Na *Física Clássica*, a energia cinética de um corpo de massa m e velocidade v é: $E_c = mv^2/2$. No entanto, de acordo com a *Teoria da Relatividade*, essa equação nos dá o valor aproximado de energia cinética quando a velocidade v é pequena em comparação com c , a velocidade da luz. A equação que nos dá o valor exato da energia cinética é outra. Vamos supor um corpo em repouso, em relação a um certo referencial inercial, sua massa m_0 (massa de repouso), está relacionada com sua energia através da Eq. (6), ou seja,

$$E_0 = m_0 c^2$$

Onde E_0 é a energia de repouso. Se uma força realizar trabalho sobre o corpo, ele passará a ter uma velocidade v e uma massa m dada pela Eq. (5). Com isso, o novo conteúdo energético do corpo será dado por: $E = mc^2$. A energia cinética do corpo é dada pela diferença entre E e E_0 : como $E = mc^2$ e $E_0 = m_0 c^2$, obtemos:

$$\boxed{E_c = (m - m_0) c^2} \quad (7)$$

Unidades de massa e energia

Os físicos nucleares usam freqüentemente unidades que não pertencem ao SI. No caso da energia, em vez do joule eles preferem o elétron-volt (eV). 1 eV expresso em joule é numericamente igual à carga elementar expressa em Coulomb: como $e=1,6021773 \times 10^{-19}$ C, concluímos que:

$$1 \text{ eV} = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Outras unidades freqüentemente usadas são o keV e o MeV:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

No caso da massa, são usadas com freqüência a unidade de massa atômica (u.m.a) e também uma outra unidade obtida a partir da equação de Einstein:

$$m = E/c^2$$

Expressando a energia em MeV, obtemos a massa numa outra unidade: o MeV/c².

Para calcular a equivalência entre o kg e o MeV/c², fazemos $m = 1 \text{ kg}$ e adotamos para a velocidade da luz o valor mais preciso: $c = 2,9979246 \times 10^8 \text{ m/s}$. Substituindo os valores na Eq. (6), obtemos:

$$1 \text{ kg} = 5,6095864 \times 10^{29} \text{ MeV}/c^2$$

Efeito Doppler relativístico

Como já vimos no estudo do movimento ondulatório, se uma fonte de ondas e um observador têm algum tipo de movimento relativo entre si, as ondas emitidas pela fonte são captadas pelo observador com uma freqüência alterada, sendo maior quando ocorre aproximação e menor se ocorre afastamento entre ambos. Esse fenômeno é conhecido como **efeito Doppler-Fizeau** e ocorre com ondas mecânicas e com ondas eletromagnéticas. Neste último caso, não se aplicam as equações anteriormente deduzidas para as ondas mecânicas.

A expressão correta para o efeito Doppler longitudinal pode ser deduzido facilmente, lembrando que $f = 1/T$ e usando a Eq. (3) que fornece a dilatação do tempo. Quando v é o módulo da velocidade relativa entre uma fonte e um observador, a freqüência f da onda detectada pelo observador que se aproxima da fonte se relaciona com a freqüência, f_0 da fonte através da relação:

$$f = f_0 [(c+v)/(c-v)]^{1/2}$$

Quando $v \ll c$, a relação anterior se reduz a: $f = f_o v/c$, quando a fonte se afasta do observador, para se obter a fórmula correta basta trocar v por $-v$ na relação anterior. Obtemos:

$$f = f_o [(c-v)/(c+v)]^{1/2}$$

como $c = \lambda f$, obtemos facilmente a seguinte equação para o comprimento de onda medido por um observador que se afasta de uma fonte que emite uma onda cujo comprimento de onda é λ_o .

$$\boxed{\lambda = \lambda_o [(c+v)/(c-v)]^{1/2}} \quad (8)$$

Apesar de ser mais comum observarmos o efeito Doppler com ondas sonoras, sua ocorrência com ondas eletromagnéticas é confirmada observando-se a luz emitida por galáxias distantes, em geral essas galáxias se afastam de nós, as radiações por elas emitidas têm os seus respectivos comprimentos de onda deslocados para valores maiores do que teriam se elas estivessem em repouso, conforme a Eq. 8 os valores tendem para os valores da região do vermelho do espectro visível. Esse fenômeno, hoje em dia ~~muito comum~~, é conhecido como **desvio Doppler para o vermelho** (*Doppler red shift*). Em alguns casos, quando há aproximação, o desvio ocorre no sentido contrário, para o azul (*Doppler blue shift*). Esse é um recurso muito usado em Astronomia e Astrofísica. Edwin Hubble, eminente astrônomo do início do século XX, fundamentou-se nele para afirmar que "*O Universo está em expansão*". No Capítulo 3 é apresentada uma experiência sobre expansão.

2.3 RELATIVIDADE GERAL

Em 1916, Albert Einstein apresentou à comunidade científica uma generalização da sua teoria de 1905, à qual chamou de *Teoria Geral da Relatividade*. Essa teoria tratava dos fenômenos físicos observados a partir de referenciais não-inerciais, isto é, acelerado. Devido ao seu tratamento matemático extremamente complexo, durante algumas décadas ela foi considerada apenas um conjunto de equações sem muita aplicação prática e, portanto, relegada a um plano secundário na pesquisa científica da época.

Logo após a publicação dessa teoria, o eminente astrônomo e astrofísico britânico Arthur S. Eddington (1882 - 1944) tratou de se especializar nela e aplicá-la às equações da *Termodinâmica Estelar*, obtendo resultados reveladores sobre a vida e a morte das estrelas, tornando-se assim o primeiro astrofísico relativista.

Sempre houve quem colocasse em dúvida as previsões e conclusões de Einstein. Ao longo do século XX, muitos testes foram realizados para verificar quantitativamente seus cálculos. Todos comprovaram brilhantemente as previsões da teoria.

A *Teoria da Relatividade Geral* tem como ponto de partida o Princípio da Equivalência, proposto por Einstein em 1911, de acordo com o qual um referencial uniformemente acelerado em linha reta equivale a um campo gravitacional uniforme, cuja intensidade seja igual à aceleração do referencial.

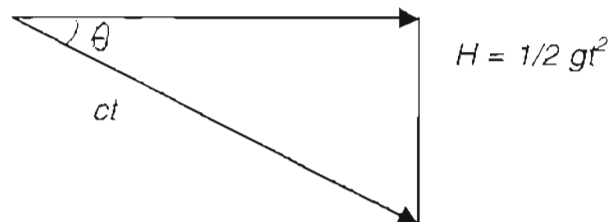


Fig. 4 Desvio gravitacional da luz

De acordo com a Fig. 4, obtemos:

$$\operatorname{tg} \theta = 1/2 (gt^2)/(ct)$$

tomando o ângulo θ pequeno, temos $\operatorname{tg} \theta$ aproximadamente igual a θ . Com isso:

$$\theta = (gt)/(2c), \text{ onde:}$$

$$gt = v = (2gh)^{1/2} \text{ e } v_0 = 0$$

$$\boxed{\Theta = (2gh)^{1/2}/(2c)} \quad (9)$$



Fig. 5 Representação dos desvios no elevador e no campo gravitacional (Ref. [3])

Na Fig. 5 é representado uma outra ilustração com o princípio de equivalência. Um feixe de luz foi disparado dentro de um elevador que sobe com aceleração uniforme a , para um observador ali presente o feixe de luz descreverá uma trajetória curva, um arco de parábola. De acordo com o princípio da equivalência, um campo de gravidade uniforme com uma aceleração gravitacional de mesma intensidade que a aceleração a , provocaria o mesmo desvio!

O desvio gravitacional da luz só pôde ser testado experimentalmente muito tempo depois, por observações de eclipses solares, com resultados em total acordo com a teoria.

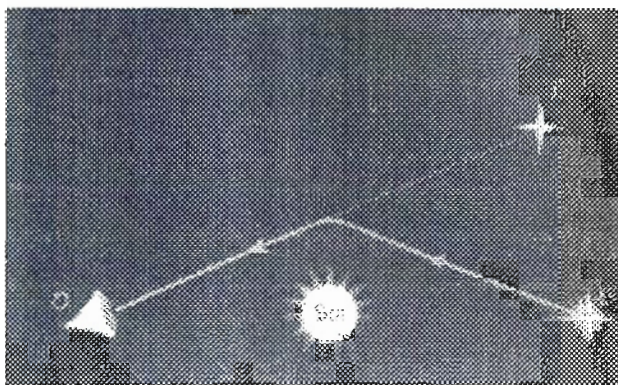


Fig. 6 Teste experimental do desvio gravitacional da luz. (Ref. [3])

A Fig. 6 mostra o que ocorre com a luz emitida por uma estrela ao passar por um campo gravitacional intenso, como o do Sol. Para um observador em O a luz parece vir de E', imagem gravitacional da estrela E, esse efeito é conhecido como lente gravitacional. Esse efeito nos permite "ver" imagens de objetos cuja visão direta é obstruída parcial ou totalmente por outro.

A *Teoria da Relatividade Restrita* foi elaborada simultaneamente por Lorentz, Poincaré e Einstein. Constitui um fato comparável em importância à *Teoria da Gravitação de Newton* e à *Teoria Quântica*.

A *Teoria Geral da Relatividade*, um pouco mais nova que a *Restrita*, abriu infindáveis campos de pesquisa teóricos e práticos, como a *Cosmologia*, a *Astrofísica Relativística* e a *Teoria do Campo Unificado*. As duas teorias da relatividade passaram com louvor por todos os testes experimentais aos quais foram exaustivamente submetidas. Muito já se descobriu e ainda há muito mais para se descobrir com os fundamentos que as teorias de Einstein nos deixaram.

A *Teoria da Relatividade Geral* tem sido testada experimentalmente, inclusive os três testes propostos por Einstein. A previsão do avanço do Periélio da órbita de Mercúrio, a previsão do encurvamento da trajetória da luz em um campo gravitacional e o desvio gravitacional para o vermelho.

Desvio Gravitacional para o Vermelho

Vamos supor uma fonte de ondas eletromagnéticas situada a uma altura H acima do solo que emite onda de frequência f_0 em direção a um detector situado no solo. Cada fóton abandona a fonte com energia:

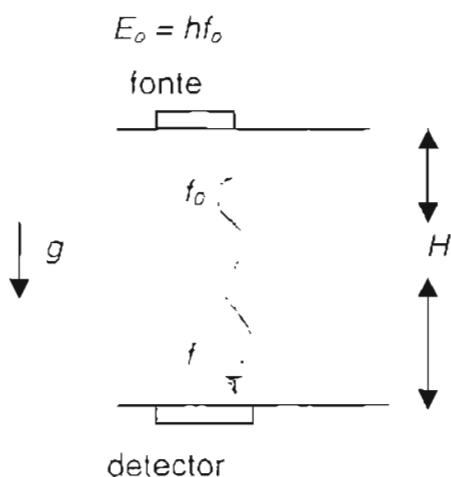


Fig. 7 Mudança de frequência em potenciais diferentes

Supondo que nesse trecho a aceleração da gravidade possa ser considerada constante, a energia potencial do fóton ao abandonar a fonte é:

$$E_p = mgh$$

Como $m = hf_0/c^2$, então:

$$E_p = mgh = (hf_0/c^2)gh$$

Ao atingir a fonte, o fóton terá energia potencial nula e frequência f , de modo que sua energia será:

$$E = hf$$

Pela conservação da energia, temos:

$$\begin{aligned} E &= E_0 + E_p \\ hf &= hf_0 + (hf_0/c^2)gh \\ f - f_0 &= f_0 gh/c^2 \end{aligned}$$

$$\boxed{\Delta f/f_0 = \Phi/c^2} \quad (10)$$

No caso mais geral de uma massa M esférica e estacionária, a variação de potencial gravitacional entre um ponto situado a uma distância R do centro e um ponto situado no infinito é dada por

$$\Phi = GM/R$$

e o desvio de frequência é dado por $\Delta f/f_0 = (f_0 - f)/f_0 = GM/c^2 R$

ou

$$\boxed{f/f_0 = 1 - GM/c^2 R \text{ (Desvio gravitacional para o vermelho)}} \quad (11)$$

Observe que se o raio luminoso está se propagando no sentido oposto, isto é, de um potencial gravitacional maior para um potencial gravitacional menor, teremos :

$$\boxed{f/f_0 = 1 + GM/c^2 R \text{ (Desvio gravitacional para o azul)}} \quad (12)$$

Os efeitos da gravitação sobre a frequência da luz das estrelas são muito difíceis de detectar porque um raio luminoso está sujeito a vários desvios durante o percurso. Por exemplo: a luz pode sofrer um desvio gravitacional para o vermelho ao deixar a estrela e um desvio gravitacional para o azul ao se aproximar da Terra. Além disso, o desvio de frequência pode ter causas não-

gravitacionais, como o efeito Doppler. Na verdade, o desvio para o azul causado pelo campo gravitacional da Terra é tão pequeno que não pode ser medido por equipamentos atuais; por outro lado, o desvio para o vermelho produzido pelo efeito Doppler associado à expansão geral do Universo é normalmente muito maior que os efeitos gravitacionais e, juntamente como o alargamento térmico do espectro de frequências causado pelas atmosferas estelares, leva a grandes imprecisões nas medidas. Assim, é notável que a previsão relativística tenha sido testada com sucesso no campo gravitacional relativamente pequeno da Terra. R.V. Pound e colaboradores, primeiro em 1960 e depois em 1964, com maior precisão, mediram o desvio de frequência dos raios gama de 14,4 keV emitidos por átomos de *Fe* enquanto caíam de uma distância *h* de apenas 22,5 m. A diferença entre os resultados que obtiveram usando o efeito Mossbauer, uma técnica extremamente precisa para medir desvios de frequência descoberta em 1958, e o resultado previsto pela *Teoria da Relatividade Geral*, $\Delta f/f_0 = gh/c^2 = 2,45 \times 10^{-15}$, foi de menos de 1%. Os resultados expressos foram submetidos a vários testes experimentais usando relógios atômicos transportados a bordo de aeronaves. Em 1980, R. V. C. Vessot e colaboradores empregaram um transmissor de microondas extremamente preciso transportado a uma distância de 10.000 km da Terra por uma sonda espacial. Todos esses experimentos confirmaram as previsões relativísticas, o último com uma precisão de uma parte em 14.000.

Buraco Negro

A *Teoria da Relatividade Geral*, em 1915, também previa a existência de buracos negros. Seriam estrelas gigantes colapsadas por uma atração gravitacional tão grande que deformariam radicalmente o espaço. Einstein comparou-as ao impacto de uma barra de ferro num colchão de espuma sobre o qual estivessem espalhadas diversas bolas de gude. A barra deformaria de tal modo a superfície do colchão, afundando-a, que a depressão atrairia as bolas imediatamente.

O conceito de buraco negro é um dos mais interessantes produtos da *Teoria da Gravitação Moderna*, embora a idéia fundamental possa ser entendida com base nos princípios da *Mecânica Newtoniana*. Pense sobre as propriedades do Sol. Possui um raio $R = 6,96 \times 10^8$ m e sua massa $M = 1,99 \times 10^{30}$ kg é muito maior

do que a massa de qualquer planeta, porém em comparação com outras estrelas, o Sol não possui massa excepcionalmente grande.

Raciocine acerca da velocidade de escape de um corpo da superfície do Sol. Verifiquemos que a velocidade de escape da superfície de um corpo esférico com massa M e raio R é dada por:

$$v = (2GM/R)^{1/2} = (8\pi G\rho/3)^{1/2} R \quad (13)$$

Substituindo os valores numéricos você pode mostrar que a velocidade de escape de um corpo da superfície do Sol é dada por $v = 6,18 \times 10^3$ m/s (cerca de 2,2 milhões de km/h). Este valor, igual aproximadamente 1/500 da velocidade da luz, é independente da massa do corpo que escapa; depende apenas da massa e do raio (ou do raio e da densidade média) do Sol.

Considere agora diversas estrelas com a mesma densidade média ρ mas com diferentes raios R . A Eq. 13 mostra que para um dado valor da densidade média ρ a velocidade de escape v é diretamente proporcional a R . Em 1783, John Mitchell, um astrônomo amador, notou que se um corpo com a mesma densidade média do Sol tivesse um raio aproximadamente 500 vezes maior do que o raio do Sol, o módulo da velocidade de escape seria maior do que a velocidade da luz c , conforme ele afirmou, "toda luz emitida por este corpo seria atraída para seu interior". Mitchell tornou-se o primeiro homem a sugerir a existência daquilo que hoje chamamos de buraco negro.

A primeira expressão para a velocidade de escape também sugere que o corpo com massa M pode se converter em um buraco negro caso seu raio R seja menor do que um certo raio crítico. Como determinar este raio crítico? você pode pensar que podemos responder a esta pergunta simplesmente substituindo $v = c$ na equação da velocidade de escape. Na realidade, este procedimento fornece uma resposta correta, mas somente por causa de dois erros que se compensam. A energia cinética da luz não é dada por $mc^2/2$, e a energia potencial gravitacional nas vizinhanças de um buraco negro não é dada pela equação clássica. Em 1916, Karl Schwarzschild usou a *Teoria da Relatividade Geral* de Einstein (em parte uma generalização e extensão da *Teoria Newtoniana da Gravitação*) para deduzir uma expressão para o raio crítico R_s , atualmente chamado de raio de

Schwarzschild. Verifica-se que o resultado é igual ao obtido quando substituímos $v = c$ na Eq. 13, obtemos:

$$c = (2GM/R_s)^{1/2}$$

Explicitando o raio de Schwarzschild R_s , obtemos

$$R_s = 2GM/c^2$$

Quando um corpo esférico com massa M , que não está girando, possui um raio menor do que R_s , então nada (nem mesmo a luz) pode escapar da superfície do corpo, e o corpo é um buraco negro.

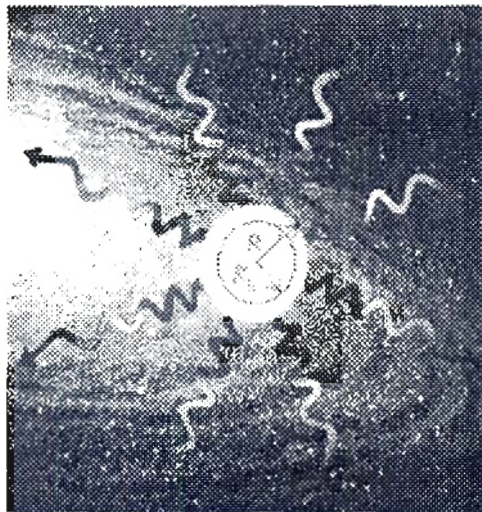


Fig. 8 Quando o raio R de um corpo é maior do que o raio de Schwarzschild R_s , a luz pode escapar da superfície do corpo. Quando sai do corpo, ela sofre um "desvio para o vermelho" aumentando o seu comprimento de onda. (Ref. [10])

Neste caso, qualquer outro corpo situado até uma distância igual a R_s do centro do buraco negro é aprisionado pela atração gravitacional do buraco negro e não pode dele escapar.

A superfície da esfera com raio R_s concêntrica com o buraco negro denomina-se horizonte dos eventos porque, uma vez que a luz não pode escapar do seu interior, não podemos ver nenhum evento que ocorre dentro desta esfera. Um observador no exterior do horizonte dos eventos só pode conhecer um buraco negro através da sua massa (em virtude dos efeitos gravitacionais produzidos sobre outros corpos) da sua carga elétrica (em virtude das forças elétricas produzidas sobre outros corpos carregados), e através de seu momento angular

(porque um buraco negro que gira tende a arrastar o espaço - e tudo que existe naquele espaço - em torno da sua fronteira). Todas as demais informações sobre o buraco negro não podem ser recuperadas porque elas sofrem um colapso e permanecem dentro do horizonte dos eventos.

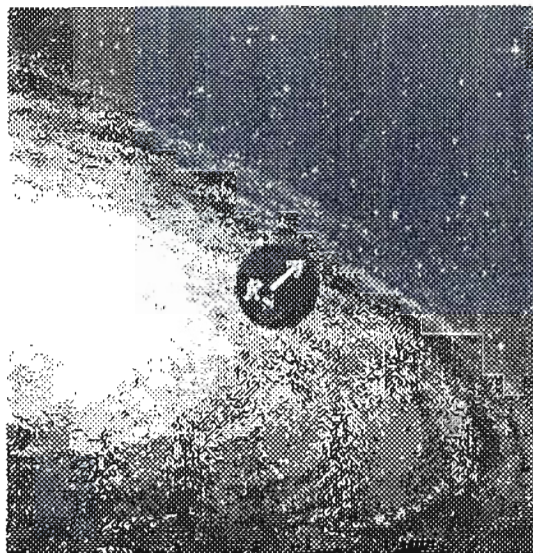


Fig. 9 Quando um corpo está dentro do horizonte dos eventos, ele é um buraco negro que possui uma velocidade de escape maior do que a velocidade da luz. Nesse caso, podemos obter pouquíssimas informações sobre o corpo. (Ref. [10])

Para pontos muito afastados do buraco negro, o efeito gravitacional é igual ao produzido por qualquer corpo normal com a mesma massa. Caso o Sol sofresse um colapso e se transformasse em um buraco negro, as órbitas dos planetas não seriam afetadas. Porém nas vizinhanças de um buraco negro os eventos ocorrem de forma dramaticamente diferente. Caso você decidisse se tornar um mártir da ciência e resolvesse entrar em um buraco negro, os amigos com os quais você se comunicava notariam diversos efeitos adversos à medida que você se aproximasse do horizonte dos eventos, quase todos relacionados com a *Relatividade Geral*. Se você levasse um transmissor de rádio para comentar sua viagem, eles teriam de sintonizar os sinais para frequências cada vez menores, um efeito chamado de deslocamento para o vermelho gravitacional. De acordo com este efeito, eles notariam que seus relógios (eletrônicos ou biológicos) permaneceriam cada vez mais lentos, um efeito chamado dilatação do tempo. Na

realidade, durante suas vidas eles jamais veriam você chegar ao horizonte dos eventos. Em seu sistema de referência, você conseguiria atingir o horizonte dos eventos em um intervalo de tempo muito curto, mas de forma destruidora. Quando você se aproximasse da superfície do buraco negro, a força gravitacional sobre os seus pés seria maior do que a força sobre sua cabeça, que estaria ligeiramente mais afastada do centro do buraco. As diferenças entre as forças gravitacionais ao longo do seu corpo seriam suficientemente elevadas a ponto de achatar seu corpo comprimindo-o em direção ao buraco negro. Antes de atingir o horizonte dos eventos, estes efeitos (chamados de forças de maré) fariam você se destroçar formando um grupo de átomos e a seguir fariam esses átomos rachar e se separar.

Visto que um buraco negro não permite que a luz escape dele e ele possui um raio muito pequeno, como podemos verificar se este corpo existe no espaço? A seguir damos uma idéia de como isso é possível. Poeiras e gases existentes nas vizinhanças do buraco negro são agrupados formando um disco de acréscimo que gira formando uma espiral em torno do buraco negro, de modo semelhante a um redemoinho.

O atrito entre as partes do material que constitui o disco de acréscimo produz uma perda de energia mecânica fazendo o material cair para dentro do buraco negro e formando uma espiral; à medida que o disco se move ele sofre uma compressão. Isso produz um aquecimento do material, tal como o aquecimento do ar comprimido no interior de uma bomba que você usa para encher o pneu de uma bicicleta. Temperaturas da ordem de 10^6 K podem ocorrer no interior de um disco de acréscimo, de modo que o disco não emite luz visível, mas sim raios X. Os astrônomos procuram esses raios X (emitidos antes do disco de acréscimo cruzar o horizonte dos eventos) para sinalizar a presença de um buraco negro. Diversos candidatos promissores já foram encontrados, e os astrônomos atualmente acreditam firmemente na existência de buracos negros.

Há também numerosas evidências sobre a existência de buracos negros com supermassas. Acredita-se que um exemplo desses buracos negros ocorra na galáxia M87, um conjunto de 10^{12} estrelas localizado a uma distância de 50 milhões de anos-luz.

As observações astronômicas como as da M87 indicam que devem existir buracos negros com supermassas no centro de muitas galáxias. De fato,

evidências indicam a existência de um buraco negro com massa cerca de 2×10^6 vezes maior do que a massa do Sol no centro da nossa galáxia, a Via Láctea. Os estudos observacionais e teóricos de tais buracos negros continuam sendo uma área excitante para pesquisas de *Física* e de *Astronomia*.

Muitos resultados importantes da *Teoria da Relatividade Geral* contribuíram para o desenvolvimento da *Cosmologia*, aparte da *Física* que estuda a origem e a evolução do Universo.

No Capítulo 3 descreveremos uma experiência simples, feita com um balão, para mostrar em sala de aula um modelo simples para entender a expansão do Universo.

2.4 EFEITO FOTOELÉTRICO

Passaremos agora a apresentar alguns tópicos de *Mecânica Quântica*.

Nos últimos anos do século XIX, experimentos demonstraram que uma luz incidindo em determinadas superfícies metálicas causavam emissão de elétrons por essas superfícies. Esse fenômeno é conhecido como efeito fotoelétrico, e os elétrons emitidos são chamados de fotoelétrons.

As primeiras evidências do efeito fotoelétrico foram obtidas por Heinrich Hertz em 1887. Atualmente as células fotoelétricas ou fotocélulas, são largamente usadas em diversos dispositivos eletrônicos, como fotômetro, controles remotos, circuitos de segurança.

Um tubo de vidro, a-vácuo, encerra um eletrodo negativo, o emissor (E), e um eletrodo positivo, o coletor (C). Quando o conjunto fotocélula é colocado no escuro, o amperímetro indica zero; não há corrente no circuito. Entretanto, quando uma radiação monocromática de determinado comprimento de onda ilumina a placa E, o amperímetro registra corrente, indicando um fluxo de cargas entre E e C. Esse fluxo deve-se aos elétrons emitidos pela placa negativa E, que são coletados pela placa positiva C.

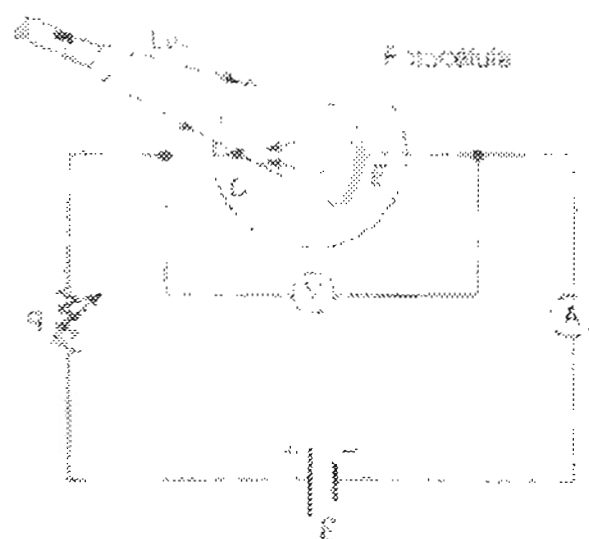


Fig.10 Montagem típica para estudar o Efeito Fotoelétrico. (Ref. [3])

O comportamento da corrente entre E e C depende da ddp aplicada à fotocélula e da intensidade da luz usada, como mostra o gráfico abaixo.

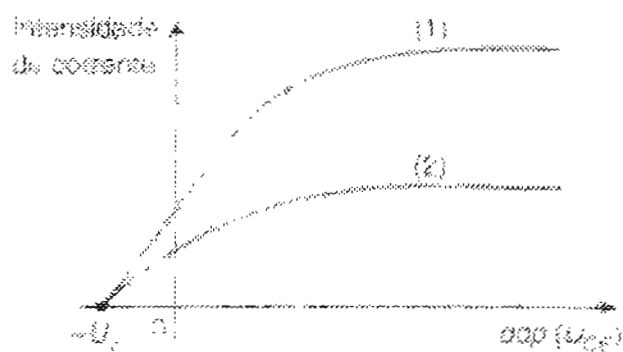


Fig. 11 O gráfico mostra que o comportamento da corrente entre E e C depende da ddp aplicada à fotocélula e da intensidade da luz usada. (Ref. [3])

A curva (1) representa a variação da corrente para luz com grande intensidade e a curva (2), a variação da corrente para luz de pequena intensidade.

Para valores de U_{CE} (ddp entre emissor E e o coletor C) suficientemente elevados, a corrente atinge sua máxima intensidade e se estabiliza nesse valor. Porém, invertendo-se a polaridade da bateria, a intensidade da corrente entre E e C diminui gradativamente, chegando a zero para $U_{CE} = -U_f$. O valor U_f é denominado potencial de freamento ou de corte.

Para valores negativos de U_{CE} , isto é, no intervalo $-U_f < U_{CE} < 0$, os fotoelétrons são repelidos pela placa C, que agora está negativa, diminuindo assim o fluxo de cargas entre E e C. Só os elétrons (carga elétrica de módulo e) que são emitidos com energia cinética superior a $e U_{CE}$ conseguem chegar à placa C. Porém o máximo valor possível para a energia cinética dos fotoelétrons é $e U_f$, uma vez que, quando $U_{CE} = -U_f$, os elétrons são totalmente freados. O valor de U_f é independente da intensidade da radiação iluminante usada.

A Física Clássica, assim como a Teoria Ondulatória da Luz, falhava ao tentar explicar certas características do efeito fotoelétrico. Por exemplo:

1. Nenhum fotoelétron será observado se a radiação iluminante tiver uma frequência inferior a um certo valor, característico do material iluminado, denominado frequência de corte (f_c).
2. Se a frequência da radiação iluminante excede a frequência de corte, observa-se que o número de fotoelétrons emitidos é proporcional à intensidade da radiação incidente, porém nenhum elétron terá energia cinética superior a $e U_f$, isto é, $E_{C(max)} = e U_f$.
3. A energia cinética máxima dos fotoelétrons aumenta, se aumentarmos a frequência da radiação iluminante.

A explicação correta para o efeito fotoelétrico foi dada por Albert Einstein (1879-1955), em 1905, mesmo ano da publicação da Teoria Especial da Relatividade. Como parte de uma publicação sobre radiação eletromagnética, que lhe valeu o prêmio Nobel em 1921, Einstein estendeu o conceito para as ondas eletromagnéticas da quantização de Planck. Admitiu que a luz e as demais radiações eletromagnéticas deveriam ser consideradas como um feixe de pacotes de energia, aos quais chamou fótons, cada um transportando uma quantidade de energia E igual a hf .

Na visão de Einstein, cada fóton cede toda sua energia hf a um único elétron do metal. Parte dessa energia é usada para "desligar" o elétron do seu átomo - energia de ligação. A essa parcela de energia ele denominou função trabalho do

material, que representaremos por W . O restante da energia do fóton incidente estará na forma de energia cinética do fotoelêtron.

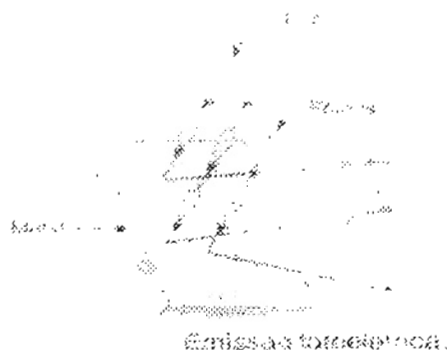


Fig. 12 Emissão Fotoelétrica. (Ref. [3])

Assim:

$$E_{C(max)} = hf - W \quad (14)$$

Lembrando que $E_{C(max)} = e U_f$, temos:

$$e U_f = hf - W \quad (15)$$

Esta fórmula constitui a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico.

Como h e e são constantes universais e W uma constante específica do material usado como emissor, vemos que U_f é uma função do 1º grau da frequência f da radiação iluminante.

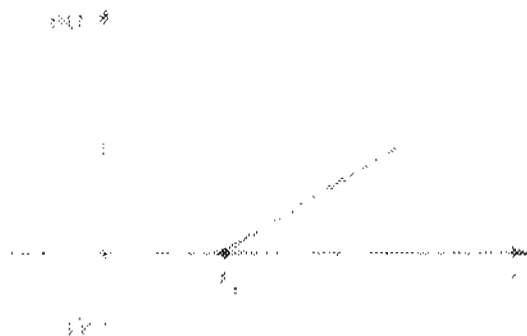


Fig.13 O trecho pontilhado do gráfico representa o intervalo de frequência para o qual não ocorre fotoemissão. Ref. ([3])

O trecho pontilhado do gráfico indicado na Fig. 13 representa o intervalo de frequências para o qual não ocorre fotoemissão. O valor f_0 , denominado frequência de corte, mostra que, para que haja emissão de elétrons, os fótons devem ter no mínimo energia hf_0 . O valor hf_0 é exatamente a função trabalho W do material usado como emissor.

No Capítulo 3 apresentaremos uma experiência sobre Fotocondutividade.

2.5 ÁTOMO DE HIDROGÊNIO

Como sabemos, o átomo de hidrogênio é o átomo mais simples que se conhece e, mesmo assim, temos grande interesse em estudá-lo mais detalhadamente. Muito do que se sabe a respeito dele pode ser estendido a íons com único elétron ao redor do núcleo, como He^+ e Li^{2+} . A *Física* que descreve o átomo de hidrogênio pode ser usada com alguns aperfeiçoamentos para átomos mais complexos.

Suponha um tubo de vidro preenchido com algum gás, por exemplo hidrogênio. Se nas extremidades do tubo colocamos eletrodos metálicos e aplicamos uma ddp suficiente para gerar uma corrente elétrica através do gás, observa-se a emissão de luz, cuja cor é característica do gás usado. Esse é o processo de funcionamento dos luminosos de propaganda (neons) e lâmpadas utilizadas em iluminação pública (lâmpadas vapor de mercúrio e vapor de sódio).

Analisando-se a luz emitida em um espectroscópio (aparelho que decompõe a luz através de um prisma, difratando-a a seguir), observa-se uma série de linhas discretas e bem definidas, cada linha corresponde a uma cor, caracterizada por um comprimento de onda específico. Essa série de **raias espectrais**, como são normalmente chamadas as linhas, denomina-se **espectro de emissão**.

O espectro de emissão do gás é a sua marca registrada, sua "impressão digital". Nunca dois elementos diferentes terão o mesmo espectro. Este é um excelente método para se identificarem os elementos componentes de uma substância gasosa.

O modelo atômico de Bohr não só explica a existência das raias espectrais do hidrogênio como também permitia calcular seus comprimentos de onda com uma precisão de 0,02%.

Apesar de ter sido um total sucesso para o átomo de hidrogênio, a *Teoria de Bohr* falhava na descrição de átomos mais complexo. No entanto, ela foi o elo de ligação entre a velha *Teoria Quântica* (de 1900 até cerca de 1925) e a nova *Teoria Quântica*, mais conhecida como **Mecânica Quântica**.

A *Teoria de Bohr* fundamenta-se em alguns aspectos clássicos e também em algumas idéias revolucionárias, que não podem ser explicadas classicamente.

As hipóteses básicas, ou postulados da *Teoria de Bohr*, para o átomo de hidrogênio são:

1. O elétron move-se em órbitas circulares em torno do próton, sob influência da força de atração elétrica, que é força centrípeta responsável pelo movimento circular do elétron.
2. Apenas certas órbitas estáveis são permitidas ao elétron. Nessas órbitas o átomo não irradia energia. Assim, a energia total do átomo é conservada e a *Física Clássica* pode ser usada para descrever o movimento do elétron.
3. Ao passar de um estado estacionário para outro, o átomo absorve ou emite radiação. A energia do fóton absorvido ou emitido será igual à diferença de energias dos níveis envolvidos. Portanto, a frequência da radiação absorvida ou emitida será igual à do fóton envolvido na transição.

Se o átomo passa de um nível de energia E_2 para outro, $E_1 < E_2$, devemos ter:

$$\boxed{E_1 - E_2 = h f} \quad (16)$$

4. As órbitas permitidas ao elétron são aquelas nas quais o momento angular orbital (L) do elétron é múltiplo inteiro de \hbar , onde $\hbar = h/2\pi$.

Como o momento angular L é o torque da quantidade de movimento, temos para um movimento circular:

$$L = m \cdot v \cdot r$$

Ou

$$\boxed{m \cdot v \cdot r = n \cdot \hbar} \quad (17)$$

Com essas quatro hipóteses ou postulados Bohr calculou os possíveis níveis de energia e os correspondentes comprimentos de onda associados, para o átomo de hidrogênio, obtendo magnífica concordância com a experiência.

A seguir de atração elétrica ($F = K_0 |q_1 \cdot q_2| / d^2$) entre o próton e o elétron

É a força centrípeta do movimento circular orbital do n elétron:

$$K_0 e^2 / r_n^2 = m \cdot v^2 / r_n \rightarrow m \cdot v^2 = K_0 e^2 / r_n$$

Portanto, a energia cinética do elétron para o n -ésimo estado estacionário será:

$$E_c = m \cdot v^2 / 2 = K_0 e^2 / 2 \cdot r_n$$

Isolando v^2 na expressão acima e utilizando um pouco de álgebra obtemos:

$$r_n = n^2 \cdot \hbar^2 / m \cdot K_0 \cdot e^2$$

para $n = 1$ temos o raio r , do estado estacionário **fundamental**:

$$r_1 = \hbar^2 / m \cdot K_0 \cdot e^2 = 0.53 \text{ \AA}$$

que é denominado raio de Bohr ($r_1 = r_b$).

assim, para os outros estados permitidos, temos:

$$r_n = n^2 \cdot r_b$$

a energia potencial elétrica E_p de um sistema de duas cargas pontuais é dada por:

$$E_p = K_0 q_1 \cdot q_2 / d^2$$

Assim, a energia mecânica total E do elétron no n -ésimo estado estacionário será:

$$E = E_p + E_c$$

Substituindo E_p e E_c na expressão anterior obtemos:

$$E = - K_0 \cdot e^2 / 2 \cdot r_b (1/n^2)$$

Substituindo numericamente as constantes e , K_e , r_e , obtemos a fórmula de Bohr:

$$E = - 13.6/n^2 \text{ (eV)}$$

A fórmula de Bohr, embora não aplicável em todos os casos, tem sua importância, pois prevê com magnífica precisão os níveis de energia para o átomo de hidrogênio e também para sistemas hidrogenóides, isto é, íons com apenas um elétron em torno do núcleo. Nesses casos, a fórmula de Bohr fica :

$$E = - 13.6 \cdot Z^2/n^2 \text{ (eV)} \quad (18)$$

Onde Z é o número atômico do íon.

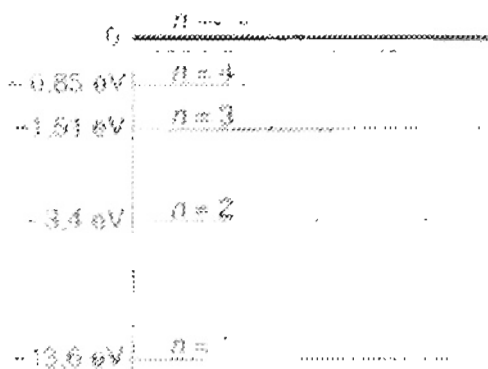


Fig. 14 Níveis de energia ou estados estacionários do átomo de hidrogênio. (Ref. [3])

2.6 A DUALIDADE ONDA PARTÍCULA

A teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico nos dá uma forte evidência em favor da idéia dos fótons ou partículas de luz. Esses fenômenos nos mostram que luz de frequência f , quando interage com a matéria, o faz como se fosse constituída por partículas com energia $E = h f$.

Entretanto, os fenômenos de difração e interferência só podem ser explicados considerando a luz como uma onda. Essa aparente confusão levanta uma questão crucial: "Afinal, a luz é onda ou partícula?"

Se, por um lado, somente o modelo de fótons explica adequadamente o efeito fotoelétrico, por outro, somente o modelo ondulatório explica a difração e a interferência. Então, qual modelo é correto? A resposta é simples, mas, incômoda. Devemos aceitar ambos os modelos! A verdadeira natureza da luz, e das demais radiações eletromagnéticas, não deve ser descrita apenas por um único modelo teórico. O fóton, necessário para explicar o efeito fotoelétrico, e a onda, necessária para explicar a difração e a interferência, complementam-se mutuamente.

A luz tem uma natureza dual, isto é, exibe características ora de onda, ora de partícula.

O enunciado a seguir é o denominado princípio da complementaridade de Bohr:

No nível quântico, ambos os aspectos, o corpuscular e o ondulatório, são necessários para uma descrição completa do sistema estudado.

Entretanto, apenas um desses aspectos é relevado numa experiência isolada. O tipo de experiência realizada é que determina qual.

Entendendo melhor: um feixe de luz, vindo de um canhão laser, propagando-se no laboratório, deve ser considerado onda ou um feixe de partículas?

Essa pergunta só tem resposta se, de alguma forma, interagimos com o feixe. Se o interceptamos com uma grade de difração, o feixe difratará, apresentando comportamento de onda. Se o interceptamos com uma placa de material fotoemissor (silício, por exemplo), fotoelétrons serão emitidos, apresentando comportamento corpuscular.

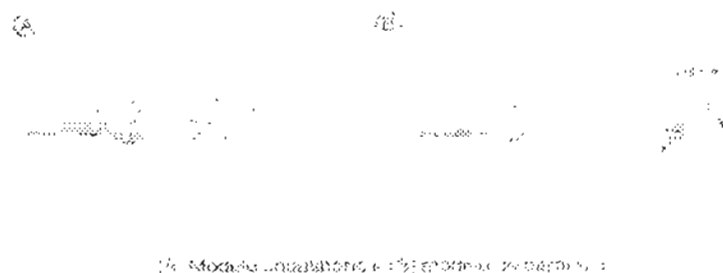


Fig. 15 Modelo ondulatório e modelo de partícula da luz. (Ref. [3])

Nenhum dos modelos deve ser usado isoladamente para descrever as propriedades da luz. Uma descrição completa e correta do comportamento da luz só é válida quando ambos os modelos são combinados de maneira complementar.

Se a natureza dual da luz é, por si só, um conceito difícil de aceitar, mais intrigante ainda é o fato de que também a matéria apresenta natureza dual!

Em 1923, em sua tese de doutorado, o físico francês Louis Victor, Duque de Broglie, ou Louis de Broglie (1892-1987), como ficou mais conhecido, lançou uma idéia ousada e inovadora na *Física*:

"Se fótons apresentam características de ondas e de partículas...[6], se elétrons são partículas, mas, também apresentam características ondulatórias, talvez todas as formas de matéria tenham características duais de onda e partícula".

Partindo dessa idéia, de Broglie sugeriu que partículas materiais também apresentariam propriedades ondulatórias e, conseqüentemente, um comprimento de onda característico, determinado pela sua quantidade de movimento. Tal comprimento de onda, denominado comprimento de onda de de Broglie associado à partícula é dado por:

$$\lambda = h/Q \rightarrow \lambda = h/mv$$

em que h é a constante de Planck.

Nessa fórmula fica evidente a hipótese dual da matéria. O caráter ondulatório é representado pelo comprimento de onda λ , e o caráter corpuscular, pela quantidade de movimento mv .

Até a época de sua formulação, nenhuma evidência experimental confirmava a hipótese da dualidade.

A proposta de de Broglie foi inicialmente encarada como mera especulação. Seus opositores argumentavam que, se realmente a matéria tivesse qualquer caráter dual, deveríamos esperar que elétrons, em condições adequadas, sofressem difração ao passarem por fendas, fato que, até então, não se havia observado.

Entretanto, em 1927, três anos após de Broglie publicar seu trabalho, C. J. Davisson e L. H. Germer, cientistas dos Laboratórios Bell, usando um alvo de níquel como rede de difração, mediram o comprimento de onda de elétrons acelerados, confirmando experimentalmente a teoria do físico francês, embora a idéia original fosse derrubar a hipótese de de Broglie.

3 EXPERIÊNCIAS DE FÍSICA MODERNA

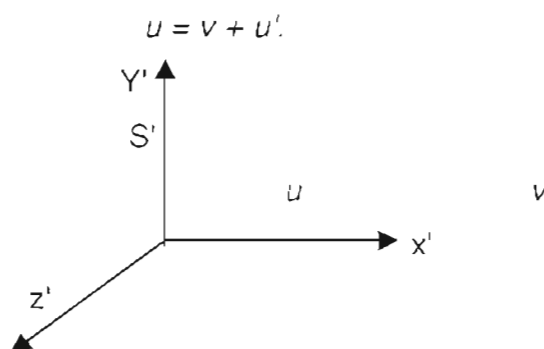
3.1 COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE AS EXPERIÊNCIAS

Existe uma grande dificuldade de se levar para sala de aula e realizar em laboratórios experiências sobre *Física Moderna*, especialmente no caso da *Teoria da Relatividade Restrita*, visto que a velocidade envolvida na prática é muito menor do que a velocidade da luz e, portanto, aproximadamente, as previsões da *Teoria da Relatividade Restrita* são as mesmas que as obtidas mediante cálculos baseados na *Mecânica Clássica*.

Assim sugiro alguns exercícios (experiências imaginárias) que podem ser analisadas em caráter experimental. A experiência número 1 a seguir apresentada é uma "experiência imaginária" que objetiva analisar as diferenças entre a *Teoria da Relatividade Galileana* e a *Teoria da Relatividade Restrita* de Einstein.

3.2 EXPERIÊNCIA IMAGINÁRIA 1

Ao estudarmos a *Teoria da Relatividade Galileana*, se as velocidades têm a mesma direção e sentido, o módulo da velocidade v da partícula em relação a S é:



Na *Teoria da Relatividade Restrita*, essa é uma igualdade aproximada. Quando as velocidades envolvidas têm valores próximos ao da velocidade da luz, vale a expressão: $u = (V + u')/[1+(u'v)/c^2]$

Material utilizado:

Papel

Calculadora

Caneta

Objetivo: Analisar as principais diferenças entre a *Teoria da Relatividade Galileana* e a *Teoria da Relatividade Restrita*, ou seja a diferença entre a *Física Clássica* e a *Física Moderna*.

1. Calcular a velocidade que uma pessoa dentro de uma espaçonave mede em relação à outra pessoa dentro de outra espaçonave que está se aproximando da primeira espaçonave em sentido contrário, ambas possuem uma velocidade $(3/4)c$ em relação a um observador na Terra.
2. Provar que se o produto $(u \cdot v)$ for muito menor que c , a expressão relativística assume a forma da expressão galileana $u = v + u'$.
3. Provar que se a velocidade das espaçonaves é c seu valor não se altera em relação a nenhum referencial, como estabelece o Segundo Postulado da *Teoria da Relatividade Restrita*.

Procedimento

Um aluno, irá até o quadro e desenhará duas espaçonaves se aproximando frente a frente, cada uma se aproximando com velocidades determinadas pelos objetos citados, em relação a um observador na Terra.

Os alunos utilizando a fórmula da Teoria da Relatividade Restrita calculam as velocidades de acordo com o que foi pedido.

Comentários

Nesta experiência foram analisadas situações com velocidades próximas, iguais e menores que a velocidade da luz. Sendo assim possível observar a diferença entre a *Física Clássica* e a *Física Moderna*.

3.3 EXPERIÊNCIA 2

Conforme vimos na seção 2.3, a Teoria da Relatividade Geral fornece uma visão diferente da expansão. De acordo com esta teoria o aumento do comprimento de onda não é causada pelo efeito Doppler oriundo do movimento relativo. O aumento provém da expansão do próprio Universo e tudo no espaço intergaláctico, inclusive o comprimento de onda de uma luz emitida por uma fonte distante e se aproximando da Terra.

Material Utilizado

Balão de festas de aniversário (de preferência o grande)

Caneta hidrocor

Régua

Objetivo: Mostrar como o Universo e tudo existente nele (galáxias, planetas, estrelas e etc) sofrem uma expansão.

Procedimento Experimental

Através da superfície esférica de um balão, marcamos dois pontos. Para representar duas galáxias. À medida que inflamos o balão a distância entre os pontos aumenta.

3.4 EXPERIÊNCIA 3

Na seção 2.4 estudamos o efeito fotoelétrico. Este efeito tem muitas aplicações práticas no mundo moderno, sua presença é marcada na indústria, medicina, tecnologia militar e outros setores. Na fotocondutividade, há um aumento da condutividade de um material semicondutor provocada pela excitação dos portadores de carga adicionais, causada pelos fótons da radiação incidente. Células fotocondutoras, conhecidas pela sigla LDR (light dependent resistor - fotorresistor), feitas de cádmio ou compostos de enxofre (sulfetos), são utilizadas neste efeito. Iluminadas, elas têm baixa resistência; no escuro, elas têm alta resistência.

Material Utilizado:

LED (vermelho ou verde)

Fotorresistor

Bateria de 9 V e suporte

Lanterna

Fios

Pedaço de isopor

Objetivo: Mostrar que as luzes são pacotes de energia (fótons) que ao interagirem com a matéria transferem sua energia para elétrons dos materiais, esses elétrons ao adquirirem energia na forma cinética entram em movimento ordenado produzindo assim correntes elétricas.

Procedimento Experimental

Os equipamentos devem ser conectados em série e fixados no pedaço de isopor. os fios que saem do suporte da bateria devem ser conectados ao fotorresistor e em seguida ao led. tudo em série. Devemos observar que enquanto o fotorresistor está no escuro não há condução de corrente. porém, quando o mesmo é iluminado com auxílio de uma lanterna ou lâmpadas ambiente, circulará uma corrente no circuito, suficiente para acender o led.

Comentários

Esta experiência propicia uma visualização do efeito fotoelétrico com materiais de baixo custo. ela pode ser melhorada em vários aspectos e também feita com outros materiais.

3.5 EXPERIÊNCIA 4

Objetivo: Observar o espectro de emissão, de forma qualitativa, de algumas lâmpadas.

Material Utilizado:

Lâmpada da sala (fluorescente ou incandescente)

Luz do Sol

Um CD

Procedimento:

Direcione o CD para a luz e observe as cores por ele refletidas. O espectro de difração de um gás funciona como uma impressão digital de um ser humano, ou seja, o espectro de emissão de um gás é a sua "impressão digital". O CD funciona como uma rede de difração por reflexão, significando que a luz ao incidir sobre ele é espalhada (decomposta) em suas componentes fundamentais.

4 CONCLUSÃO

A *Física Moderna* está completamente inserida na vida moderna. Ao realizar este trabalho tive duas grandes surpresas: a primeira é que existe grande quantidade de livros didáticos e de divulgação científica sobre tópicos de *Relatividade e Física Quântica*, músicas, peças teatrais, piadas, revistas, etc. A segunda é a imensa dificuldade de se conseguir experiências de *Física Moderna*, essa dificuldade é grande em livros e inclusive na INTERNET.

Como principal dificuldade deste trabalho, destaco a complexidade dos assuntos; é preciso muita dedicação e estudo para um bom domínio dos tópicos. Não podemos esquecer as limitações dos alunos do ensino médio em aprender, então quanto melhor estiver preparado o professor, melhor será a transmissão de conhecimento e conseqüentemente, menores também serão as dificuldades. Quando a escola possui recursos a situação melhora um pouco, porque se torna possível a utilização de computadores, vídeos, kits didáticos especiais, etc. Com relação à parte das experiências é preciso muito conhecimento e disposição, para realizá-las, uma vez que, praticamente não temos literatura sobre o assunto.

Como ponto positivo deste trabalho destaco a análise e o progresso da vida moderna, melhor demonstração de certos adventos atuais como o laser, os computadores, etc.

Assim tomando como base o PCN [1], esperamos atingir da maneira contagiante professores, alunos e enfim toda a sociedade. Ao meu ver o professor que dedicar boa parte de seu tempo para melhorar o ensino de *Física Moderna* no ensino médio, certamente, terá assegurado não só o seu emprego como também uma melhor maneira de fazer ciência a partir do ensino médio. Dentro de pouco tempo a *Física Moderna* estará garantindo a entrada do futuro médico, engenheiro, etc, nas universidades através dos vestibulares. Devo lembrar que muitos vestibulares já estão utilizando questões de *Física Moderna*, principalmente nas provas de Química que tem cobrado *radioatividade* nas provas de vestibular.

Não quero mudar nada, apenas aprender e ensinar, tentar compreender e explicar os fenômenos físicos no nosso mundo.

REFERÊNCIAS

- [1] *Parâmetros Curriculares Nacionais - Ensino médio*, MEC, 1998.
- [2] Sampaio, José L.; Calçada, Caio S, - *Universo da Física I e III* - Ed. Atual, 2001.
- [3] Nicolau, Gilberto F.; Penteado, Paulo C.; Toledo, P. Soares; Torres, Carlos M. - *Física Ciência e Tecnologia* - Ed. Moderna, 2001.
- [4] Gualter, José B.; Newton Villas Boas; Helou, Ricardo D. - *Tópicos de Física 3* - Ed. Saraiva, 2001.
- [5] Alberto Gaspar - *Física 3* - Ed. Ática, 2000.
- [6] Tipler, Paul A.; Llewellyn, Ralph - *Física Moderna* - LTC Editora, 2001.
- [7] David Halliday; Robert Resnick - *Fundamentos de Física 4* - LTC Editora, 1995.
- [8] Adir M. Luiz e Sérgio L. Gouveia - *Ótica e Física Moderna* - Ed. Francisco Alves, 1989.
- [9] Alonso, Marcelo; Finn, Edward J. - *Física vol.3 - Fundamentos Quânticos e Estatísticos*- Addison-Wesley, 1968.
- [10] Young, D.; Freedman, A. - *Termodinâmica e Ondas*- Tradução e revisão técnica Adir Moysés Luiz - Addison-Wesley, 2003.